

УДК 624.953.014.27

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ НДС В УТОРНОМ УЗЛЕ РВС ОТ ХАРАКТЕРА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДНИЩА С ОСНОВАНИЕМ

ЕГОРОВ Е. А.^{1*}, *д-р техн. наук, проф.*

ДЕЙНЕГА А. С.^{2*}, *магістр.*

^{1*}Кафедра металлических, деревянных и пластмассовых конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38(067) 945-18-16, e-mail: evg_egorov@list.ru

^{2*}Кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38(097) 940-53-05, e-mail: aspen88@mail.ua, ORCID ID: [0000-0002-2847-4449](https://orcid.org/0000-0002-2847-4449)

Аннотация. Постановка проблемы. Стальные вертикальные цилиндрические резервуары (РВС) относятся к разряду массовых конструкций, широко применяемых в промышленности для хранения нефти и нефтепродуктов. Такие конструкции относятся к категории особо ответственных объектов, поэтому более глубокое изучение работы РВС и уточнение методики их расчета по-прежнему остаются весьма актуальными. Одним из наиболее ответственных узлов таких конструкций является узел сопряжения цилиндрической стенки с плоским днищем. Инженерные методики расчета данного узла детально разработаны и испытаны на типовых сериях стальных вертикальных цилиндрических резервуаров. Однако в основу всех таких методик принята физическая модель с двухсторонней связью днища с основанием. В действительности днище и основание имеют одностороннюю связь (основание не препятствует вертикальному перемещению днища, направленному вверх). Поэтому и действительный характер узла сопряжения стенки с днищем будет отличаться от расчетного по модели с двухсторонней связью и это обстоятельство может влиять на точность получаемых при расчете результатов. **Цель статьи** – анализ особенностей НДС узла сопряжения стенки стального вертикального цилиндрического резервуара с плоским днищем при односторонней связи днища с основанием, а также различий, которые могут иметь место в результатах расчета стальных резервуаров при использовании моделей с одно- и двухсторонней связью днища с основанием. **Вывод.** При определенных соотношениях геометрических параметров, жесткости основания и уровнях нагружения стальных резервуаров могут иметь место существенные различия (от 5 до 20 %) в расчетных значениях изгибающих моментов в узле сопряжения стенки с днищем при использовании моделей с одно- и двухсторонней связью днища с основанием. При отсутствии в резервуарах внутреннего избыточного давления значения изгибающих моментов в узле сопряжения, получаемые в расчетах с односторонней связью, во всех случаях оказываются меньше, чем при двухсторонней связи. Это объясняется возникновением скрытого (внутреннего) отрыва днища от основания. Учет указанного обстоятельства позволяет в целом ряде случаев снизить расход металла и получить определенный экономический эффект.

Ключевые слова: *стальной вертикальный цилиндрический резервуар; уторный узел; односторонний характер связи днища с основанием; скрытый отрыв*

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ОСНОВНИХ КОМПОНЕНТІВ НДС В УТОРНОМУ ВУЗЛІ РВС ВІД ХАРАКТЕРУ ВЗАЄМОДІЇ ДНИЩА З ОСНОВОЮ

ЕГОРОВ Є. А.^{1*}, *д-р техн. наук, проф.*,

ДЕЙНЕГА А. С.^{2*}, *магістр.*

^{1*}Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38(067) 945-18-16, e-mail: evg_egorov@list.ru

^{2*}Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38(097) 940-53-05, e-mail: aspen88@mail.ua, ORCID ID: [0000-0002-2847-4449](https://orcid.org/0000-0002-2847-4449)

Анотація. Постановка проблеми. Сталеві вертикальні циліндричні резервуари (РВС) належать до розряду масових конструкцій, що широко застосовуються у промисловості для зберігання нафти та нафтопродуктів. Такі конструкції належать до категорії особливо відповідальних об'єктів, тому більш глибоке вивчення роботи РВС та уточнення методики їх розрахунку, як і раніше, актуальне. Один із найбільш відповідальних вузлів таких конструкцій - вузол сполучення циліндричної стінки із плоским днищем. Інженерні методики розрахунку цього вузла детально розроблені та добре випробувано на типових серіях вертикальних циліндричних резервуарів. Проте за основу всіх таких методик прийнята фізична модель із двостороннім зв'язком днища з основою. Насправді днище з основою має односторонній зв'язок (основа не перешкоджає вертикальному переміщенню днища, спрямованому вверх). Тому й дійсний характер вузла сполучення стінки з днищем відрізнятиметься від

розрахункового за моделлю з двостороннім зв'язком и це може впливати на точність отримуваних при розрахунку результатів. **Мета статті** - аналіз особливостей НДС вузла сполучення стінки сталевго вертикального циліндричного резервуара з плоским днищем, спричинених одностороннім характером зв'язку днища з основою, а також відмінностей, які можуть бути в результатах розрахунків сталевих резервуарів у разі використання моделей з одно- та двостороннім зв'язком днища з основою. **Висновок.** За певних співвідношень геометричних параметрів, жорсткості основи та рівнів навантаження сталевих резервуарів можуть виникати суттєві відмінності (від 5 до 20 %) в розрахункових значеннях згинальних моментів у вузлі сполучення стінки та днища у разі використання моделей з одно- та двостороннім зв'язком днища з основою. За відсутності в резервуарах внутрішнього надмірного тиску значення згинальних моментів у вузлі сполучення, отримуваних у розрахунках у випадку одностороннього зв'язку завжди виявляється меншим, ніж за двохстороннього зв'язку. Це пояснюється виникненням прихованого (внутрішнього) відриву днища від основи. Урахування вказаної обставини дозволяє у багатьох випадках знизити витрати метала та отримати певний економічний ефект.

Ключевые слова: сталевий вертикальний циліндричний резервуар; уторний вузол; односторонній характер зв'язку днища з основою; прихований відрив

STUDY OF BASE COMPONENTS OF SHELL-BOTTOM JUNCTION STRESS-STRAIN STATE DEPENDENCE ON BOTTOM-FOUNDATION INTERACTION MODEL

EGOROV E. A.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech), Prof.*,
DEYNEGA A. S.^{2*}, *Master.*

^{1*}Department of Metal, Wooden and Plastic Construction, State Higher Educational Establishment «Prydneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, Tel. +38 (067) 945-18-16, e-mail: evg_egorov@list.ru

^{2*}Department of Metal, Wooden and Plastic Construction, State Higher Educational Establishment «Prydneprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro, 49600, Ukraine, Tel. +38 (097) 940-53-05, e-mail: aspen88@mail.ua, ORCID ID: [0000-0002-2847-4449](https://orcid.org/0000-0002-2847-4449)

Summary. Raising of a problem. Steel storage tanks (SST) are relating to a mass-volume construction category, widely used in petroleum industry for crude oil and petroleum products storage. Such constructions are of category of critical objects, therefore SST performance must be deeply studied and calculation methodology must be improved. Shell-bottom junction is one of the important critical components of such constructions. This junction calculation methods are well developed and approved for steel tanks of standard series. Though all above mentioned methods are based on the physical model with bidirectional bottom-foundation connection. In fact tank bottom has a unilateral connection with foundation (foundation doesn't impede bottom upward displacement). Therefore real performance mode of shell-bottom junction differs from calculation model with bidirectional bottom-foundation connection. This fact might have influence on the computational accuracy. **Purpose.** In this article base components of shell-bottom junction stress-strain state due to unilateral bottom-foundation interaction model is being analyzed. Also the difference in tank calculation results using unilateral and bidirectional bottom-foundation connection model is studied. **Conclusion.** Under certain relation of geometric parameters, modulus of foundation and loading level of steel tank, essential differences (from 5 to 20%) in bending moment values take place in shell-bottom junction while using unilateral and bidirectional bottom-foundation interaction models. Under internal excessive pressure absence, a bending moment value in shell-bottom junction with unilateral bottom-foundation interaction was found to be smaller than in case of bidirectional bottom-foundation connection. This case can be explained by occurrence of undetected (inner) bottom uplift. This fact accounting makes it possible to reduce metal consumption and to obtain a certain saving rate.

Keywords: steel storage tank; shell-bottom junction; unilateral bottom-foundation interaction; undetected uplift

Постановка проблеми. Стальные вертикальные цилиндрические резервуары (РВС) относятся к разряду массовых конструкций, широко применяемых в промышленности для хранения нефти и нефтепродуктов. Такие конструкции относятся к категории особо ответственных объектов, разрушения или аварии которых влекут за собой не только материальный ущерб, во много раз превышающий себестоимость, но и проблемы

экологического характера. Поэтому более глубокое изучение работы РВС и уточнение методики их расчета по-прежнему остаются весьма актуальными. Одним из наиболее ответственных узлов таких конструкций является уторный узел – узел сопряжения цилиндрической стенки с плоским днищем.

Инженерные методики расчета данного узла детально разработаны и хорошо испытаны на типовых сериях стальных вертикальных цилиндрических резервуаров.

Однако в последнее время в практике проектирования все чаще встречаются случаи, когда основные геометрические параметры резервуаров существенно отличаются от типовых решений. Это приводит к целому ряду новых особенностей в работе данного узла, а следовательно, и к необходимости применения иных подходов к его расчету.

В частности, в основу всех ныне действующих методик расчета узла сопряжения стенки с днищем в стальных вертикальных цилиндрических резервуарах принята физическая модель с двухсторонней связью днища с основанием.

В действительности днище и основание имеют одностороннюю связь (основание не препятствует вертикальному перемещению днища, направленному вверх). Поэтому и действительный характер узла сопряжения стенки с днищем будет отличаться от расчетного по модели с двухсторонней связью и это обстоятельство может влиять на точность получаемых при расчете результатов.

В данной статье анализируются особенности работы узла сопряжения стенки с днищем при односторонней связи днища с основанием.

Анализ публикаций. Исследованиям напряженно-деформированного состояния (НДС) уторного узла посвящено большое количество работ, но, несмотря на это, целый ряд вопросов, связанных с работой узла в различных условиях, и по сегодняшний день остаются открытыми. Для типовых конструктивных решений РВС (в основном здесь важно соотношение высоты и диаметра) общее напряженное состояние в окрестности данного конструктивного узла даже при максимальных нагрузках (при максимальных уровнях наполнения резервуара хранимым продуктом) характеризуется общим недонапряжением.

Именно поэтому расчету данного узла не уделяется должного внимания в нормативных документах. Однако в последнее время все чаще резервуары рассматриваемого типа проектируются с существенно большей высотой стенки и с существенно большей

величиной внутреннего давления (см., например, [12]).

В этих случаях появляется реальная опасность возникновения ранее не анализируемых видов предельных состояний (ПС). К таким видам относятся ПС, связанные с возникновением внутреннего или внешнего отрыва днища от основания.

Можно отметить, что принципиальная возможность возникновения подобных эффектов уже рассматривалась в технической литературе [1; 4–7; 11], однако во всех этих работах анализ имел только постановочный (по сути, доказывалась принципиальная возможность реализации таких явлений) характер.

Примечательно, что и в исследованиях НДС уторного узла с использованием численных методов [2; 3; 8] работа узла сопряжения анализируется с традиционно применяемым допущением двухсторонней связи днища с основанием и поэтому они также не дают ответа на поставленные выше вопросы.

Цель статьи - проанализировать особенности НДС узла сопряжения стенки стального вертикального цилиндрического резервуара с плоским днищем, основываясь на одностороннем характере связи днища с основанием при различных нагрузках, параметрах геометрии резервуара и жесткости основания.

Материалы и методы. Расчеты проводились в ПК «ЛИРА». Рассматривались резервуары радиусом 1 140, 1 710, 1 995 и 3 035 см, что соответствует значениям радиусов типовых конструкций [9]. Решалась осесимметричная задача тонкостенной оболочки, опертой на плоское днище, при нагружении её внутренним гидростатическим давлением.

Цилиндрическая стенка представлялась в виде гладкой оболочки. Для построения модели использовались универсальные элементы оболочки КЭ 41 и КЭ 44 с равномерным разбиением сетки конечных элементов, а также одноузловые элементы КЭ 51 и КЭ 261 для моделирования двухсторонней и односторонней связи днища с основанием соответственно.

В качестве модели грунта применялось основание Винклера с одним коэффициентом постели C_1 . Для расчетов были приняты следующие значения C_1 : 0,05; 1 и 15 кН/см^3 , что соответствует расположению резервуара на уплотненной песчаной подушке, на железобетонном кольцевом фундаменте и на железобетонной плите соответственно [10].

Построение моделей рассчитываемых объектов и их дискретизация выполнялись с учетом двух основных требований: точности расчета, которая требует большого количества расчетных узлов (т.е. большой густоты расчетной сетки), и минимальных затрат времени, которое накладывает определенные ограничения на число расчетных узлов.

В итоге были приняты размеры конечного элемента 1×1 см. Для определения основных компонентов НДС непосредственно в точках сопряжения цилиндрической стенки с плоским дном применялась аппроксимация.

Результаты. Результаты расчетов представлялись в виде относительных величин:

$$H^* = \frac{H}{H_T}; \quad m^* = \frac{m_0}{m_T}; \quad ,$$

где: H – уровень заполнения резервуара хранимым продуктом; H_T – высота уровня хранимого продукта, определяемая по формуле: т.е. это высота, при которой мембранные напряжения на уровне точек сопряжения стенки с дном σ_0 будут равны пределу текучести σ_T , т.е. $\sigma_0 = \frac{H_T \cdot \gamma \cdot t}{r} = \sigma_T$; m_0 – величина изгибающего момента в точках сопряжения; $m_T = \frac{\sigma_T t^2}{6}$; – толщина окрайков дна; – толщина стенки.

Результаты расчетов, представленные в виде графиков (рис. 1 и 2), показывают, что для мягких оснований переход от модели с двухсторонней связью дна с основанием к модели с односторонней связью практически не сказывается на величине изгибающего момента в точках сопряжения цилиндрической стенки резервуара с плоским дном.

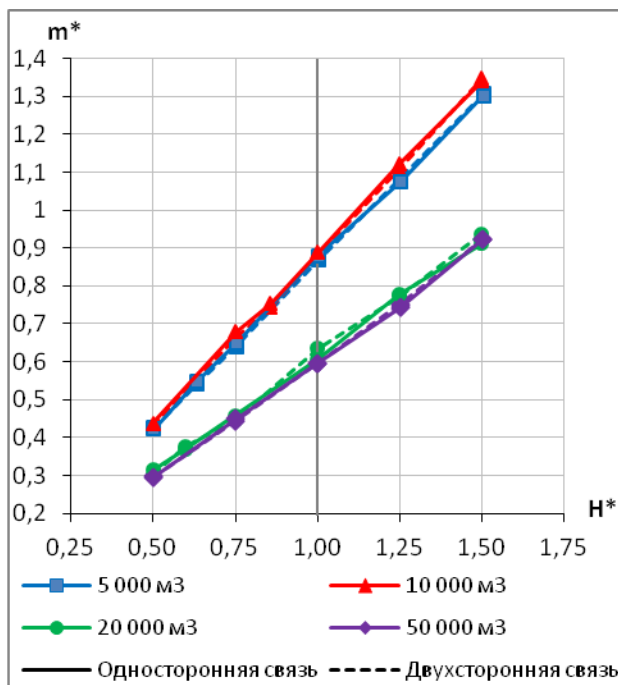


Рис. 1. Зависимости значений относительных изгибающих моментов в уторном узле ВЦР от уровня заполнения резервуара при $C_1=0,05 \text{ кН/см}^3$

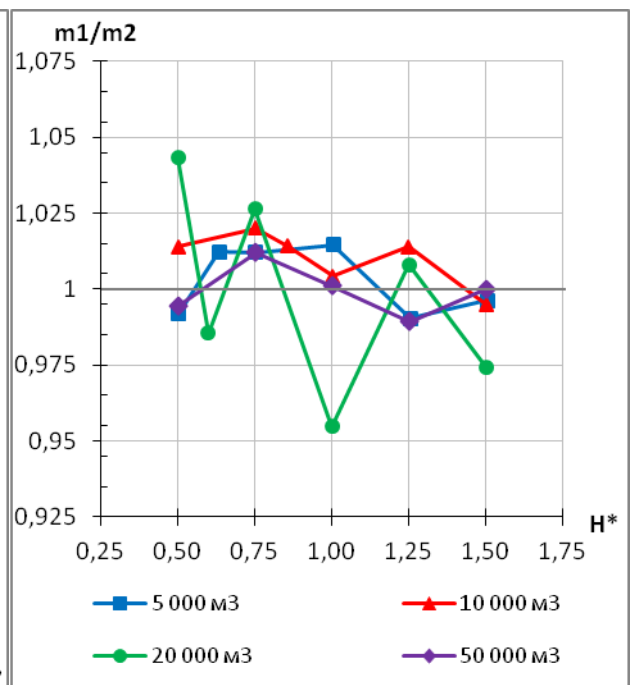


Рис. 2. Зависимости соотношений изгибающих моментов в уторном узле РВС от уровня заполнения резервуара при $C_1=0,05 \text{ кН/см}^3$ (m_1 и m_2 – максимальные изгибающие моменты при односторонней и двухсторонней связях дна с основанием соответственно)

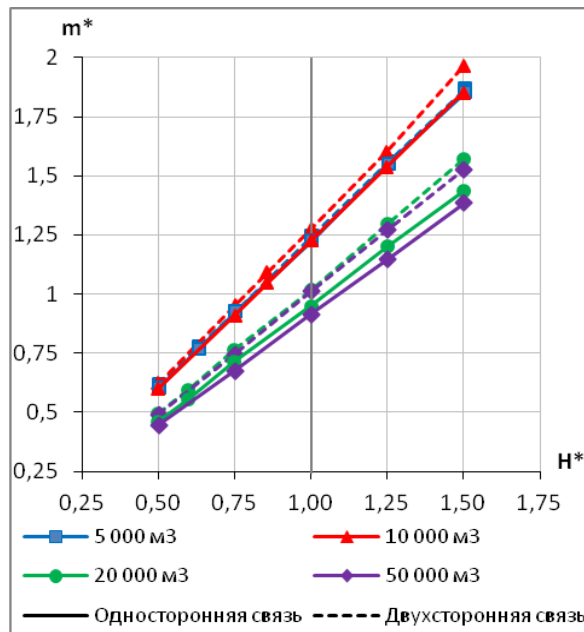


Рис. 3. Зависимости значений относительных изгибающих моментов в уторном узле ВЦР от уровня заполнения резервуара при $C1=1 \text{ кН/см}^3$

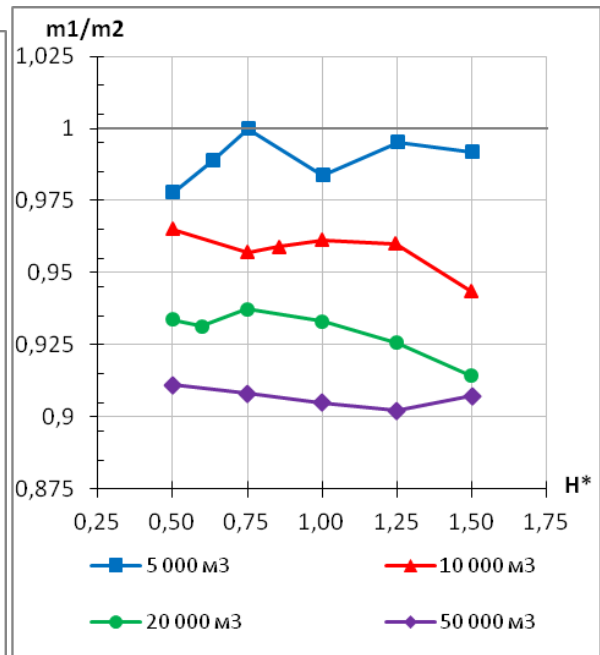


Рис. 4. Зависимости соотношений изгибающих моментов в уторном узле РВС от уровня заполнения резервуара при $C1=1 \text{ кН/см}^3$ (m_1 и m_2 – максимальные изгибающие моменты при односторонней и двухсторонней связях днища с основанием соответственно)

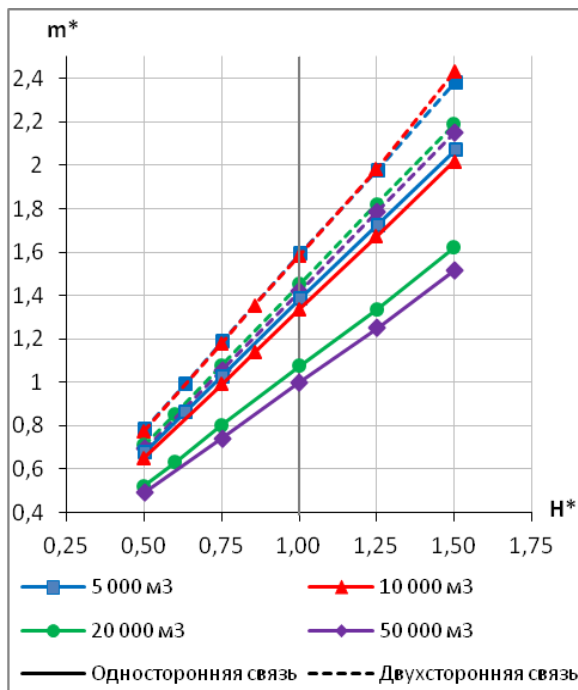


Рис. 5. Зависимости значений относительных изгибающих моментов в уторном узле ВЦР от уровня заполнения резервуара при $C1=15 \text{ кН/см}^3$

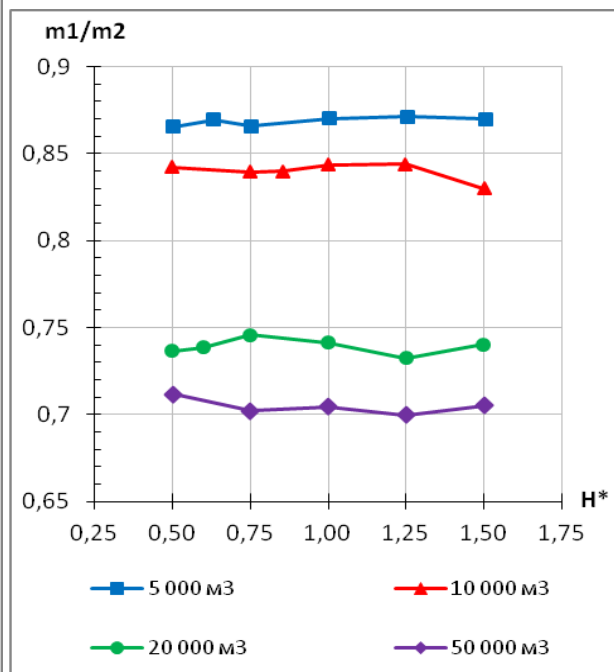


Рис. 6. Зависимости соотношений изгибающих моментов в уторном узле РВС от уровня заполнения резервуара при $C1=15 \text{ кН/см}^3$ (m_1 и m_2 – максимальные изгибающие моменты при односторонней и двухсторонней связях днища с основанием соответственно)

Разница величин максимальных изгибающих моментов в узле сопряжения составила 1,3 % для всех рассмотренных резервуаров.

Для резервуаров на жестких (рис. 3–6) основаниях величина изгибающих моментов в точках сопряжения цилиндрической стенки с плоским днищем уменьшается по

сравнению с двухсторонней связью. Это уменьшение оказывается более существенным при уменьшении жесткости крайков днища. Разница величин максимальных изгибающих моментов в уторном узле в среднем составила 5,24 % при $C1=1 \text{ кН/см}^3$ и 20,82% кН/см^3 при

$C1=15 \text{ Н/см}^3$ для всех рассмотренных резервуаров.

То есть эффект учета односторонней связи днища с основанием возрастает для резервуаров, сооруженных на жестких основаниях.

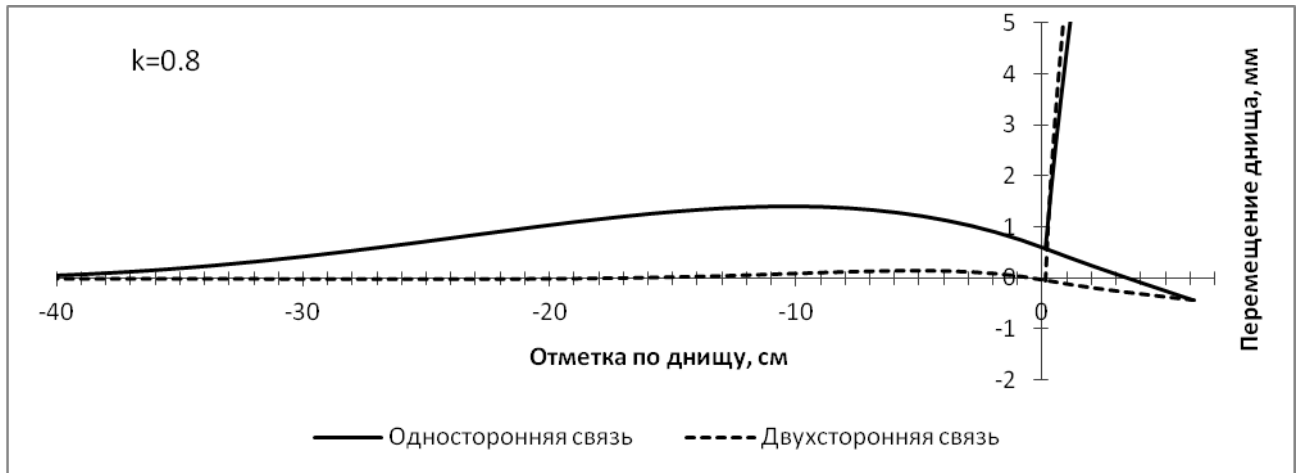


Рис. 7. Деформированная схема уторного узла резервуара с радиусом 1 995 м при уровне заполнения резервуара, расположенного на жестком основании ($C1=15 \text{ кН/см}^3$)

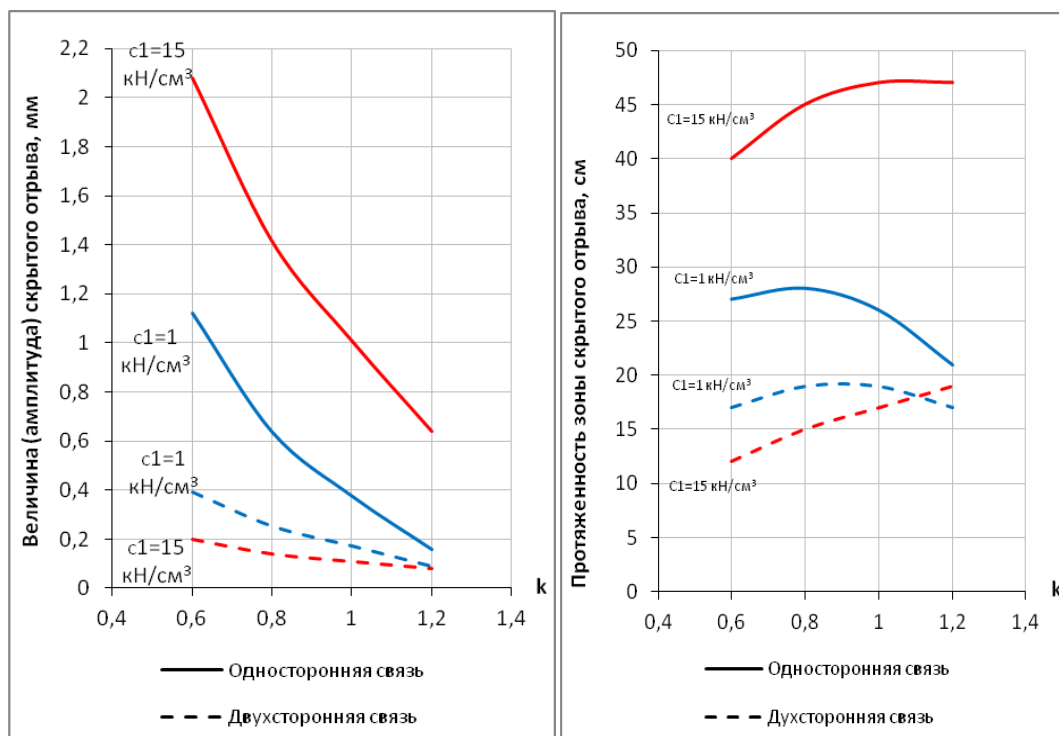


Рис. 8. Зависимости величины скрытого отрыва от соотношения толщины крайков днища и толщины стенки при $C1=15 \text{ кН/см}^3$ и при $H^*=1$

Рис. 9. Зависимости протяженности зоны скрытого отрыва от соотношения толщины крайков днища и толщины стенки при $C1=15 \text{ кН/см}^3$ и при $H^*=1$

Анализ деформаций днища стальных резервуаров в зонах, примыкающих к точкам опирания цилиндрической стенки, показывает, что в целом ряде случаев при опирании резервуара на жесткие фундаменты в указанных зонах может

возникать область скрытого отрыва днища от основания (рис. 7). Именно этот факт является главной причиной снижения изгибающих моментов в точках сопряжения при переходе к модели с односторонней связью.

На рисунках 8 и 9 показаны зависимости величины (амплитуды) скрытого отрыва и протяженности зоны его распространения от соотношения толщины крайков днища и толщины стенки. Как следовало ожидать, величина (амплитуда) скрытого отрыва уменьшается с увеличением жесткости крайков днища.

Для более жестких оснований протяженность зоны отрыва во всех случаях возрастает при любых жесткостях крайков. Чем меньше соотношение, тем больше протяженность и амплитуда скрытого отрыва.

Выводы. При определенных геометрических параметрах резервуара, уровне нагружения и жесткости основания работа узла сопряжения стенки с днищем

РВС может сопровождаться возникновением скрытого отрыва днища от основания, что приводит к изменению напряженно-деформированного состояния.

Влияние одностороннего характера связи днища с основанием на НДС уторного узла вертикальных стальных цилиндрических резервуаров возрастает с увеличением их объема и жесткости основания. При отсутствии в резервуарах внутреннего (избыточного) давления все эти эффекты приводят к уменьшению расчетных значений изгибающих моментов в узле сопряжения.

В целом ряде случаев это позволяет снизить расход металла и получить определенный экономический эффект.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галеев В. Б. Расчет нижнего узла сопряжения корпуса и днища резервуаров / В. Б. Галеев, Л. В. Короткова // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1978. – № 6. – С. 38–39.
2. Егоров Е. А. Исследование краевого эффекта в уторном узле стальных вертикальных цилиндрических резервуаров при односторонней связи днища с основанием/ Е. А. Егоров, А. С. Соколова // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 69 : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – С. 187–191.
3. Егоров Е. А. Исследование краевых эффектов в уторном узле стальных вертикальных цилиндрических резервуаров / Егоров Е. А., Соколова А. С. // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ, 2012. – № 11. – С. 16–21.
4. Егоров Е. А. Расчет вертикальных цилиндрических резервуаров на жестких фундаментах / Егоров Е. А., Братусь Н. И. // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1983. – № 5. – С. 17–18.
5. Иштиряков М. С. Напряженно-деформированное состояние днища вертикального цилиндрического резервуара / М. С. Иштиряков, В. Б. Галеев // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1977. – № 2. – С. 28–29.
6. Иштиряков М. С. Расчет днища и стенки вертикальных цилиндрических резервуаров большой вместимости / М. С. Иштиряков, В. Б. Галеев // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1978. – № 6. – С. 8–9.
7. Справочник проектировщика. Металлические конструкции : в 3 т. / под ред. В.В. Кузнецова. – Москва : АСВ, 1998. – Т. 1 : Общая часть. – 574 с.
8. Мушанов В. Ф. Исследование напряженно-деформированного состояния уторного узла в вертикальных цилиндрических резервуарах объемом 10000...50000 м³/ В. Ф. Мушанов, Д. И. Роменский // Металлические конструкции. – 2012. – Т. 18, № 1. – С. 61–71.
9. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови : ДСТУ Б В.2.6-183:2011. – [Чинний від 2012-10-01]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2012. – 77 с. – (Державний стандарт України).
10. Рудицын М. Н. Справочное пособие по сопротивлению материалов / Рудицын М. Н., Артемов П. Я., Любошиц М. И. – 2-е испр. изд. – Минск : Госиздат БССР, 1961. – 516 с.
11. Шапиро Г. А. Действительная работа плоских днищ стальных тонкостенных цилиндрических резервуаров / Г. А. Шапиро // Материалы по стальным конструкциям : сб. ст. / отв. ред. Н. П. Мельников. – Москва, 1958. – С. 185–215.
12. Научно-техническое сопровождение и особенности проектирования вертикальных тальных резервуаров емкостью 6,5 тыс. т / Шимановский А. В., Кириллов В. В., Белогуров В. Д., Уманский Р. З., Заярный Л. В., Разумов А. Ю., Курочкин Д. А., Святун Р. Я. // Промислове будівництво та інженерні споруди. – 2016. – № 4. – С. 28–35.

REFERENCE

1. Galeev V.B. and Korotkova L.V. *Raschet nizhnego uzla sopryazheniya korpusa i dnishha rezervuarov* [The lower junction calculation of the hull and the bottom of tanks]. *Transport i xranenie nefi i nefteproduktov* [Transport and storage of oil and petroleum products]. 1978, no. 6, pp. 38–39. (in Russian).
2. Egorov E.A. and Sokolova A.S. *Issledovanie kraevogo effekta v utornom uzle stal'nyx vertikal'nyx cilindricheskix rezervuarov pri odostoronnej svyazi dnishha s osnovaniem* [Investigation of the edge effect in the shell-bottom junction of steel vertical cylindrical tanks with a single-sided connection between the bottom and the base]. *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. Pridnepr. gos. akad. str-va i arxitektury [Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnepropetrovsk, 2013, iss. 69, pp. 187–191. (in Russian).
3. Egorov E.A. and Sokolova A.S. *Issledovanie kraevyx effektov v utornom uzle stal'nyx vertikal'nyx cilindricheskix rezervuarov* [Investigation of edge effects in the shell-bottom junction of steel vertical cylindrical tanks]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnictva ta arxitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk, 2012, no 11, pp. 16–21. (in Russian).
4. Egorov E.A. and Bratus' N.I. *Raschet vertikal'nyx cilindricheskix rezervuarov na zhestkix fundamentax* [Vertical cylindrical tanks calculation on hard foundations]. *Transport i xranenie nefi i nefteproduktov* [Transport and storage of oil and oil products]. 1983, no. 5, pp. 17–18. (in Russian).
5. Ishtiryakov M.S. and Galeev V.B. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie dnishha vertikal'nogo cilindricheskogo rezervuara* [The bottom stress-strain state of the of a vertical cylindrical tank]. *Transport i xranenie nefi i nefteproduktov* [Transport and storage of oil and oil products]. 1977, no. 2, pp. 28–29. (in Russian).
6. Ishtiryakov M.S. and Galeev V.B. *Raschet dnishha i stenki vertikal'nyx cilindricheskix rezervuarov bol'shoj vmestimosti* [Bottom and walls calculation of vertical cylindrical tanks of large capacity]. *Transport i xranenie nefi i nefteproduktov* [Transport and storage of oil and oil products]. 1978, no. 6, pp. 8–9. (in Russian).
7. Kuznecov V.V., ed. *Spravochnik proektirovshhika. Metallicheskie konstrukcii: v 3 t.* [Manual of the designer. Metal constructions: in 3 volumes]. Moskva: ASV, 1998, vol. 1, 574 p. (in Russian).
8. Mushhanov V.F. and Romenskij D.I. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya utornogo uzla v vertikal'nyx cilindricheskix rezervuarax ob'emom 10000...50000 m³* [Investigation of the stressed-deformed state of the shell-bottom junction in vertical cylindrical tanks with the volume of 10000 ... 50000 m³]. *Metallicheskie konstrukcii* [Metal constructions]. 2012, vol. 18, no. 1, pp. 61–71. (in Russian).
9. *Rezervuary vertikal'ni cylindrychni stalevi dlia nafty ta naftoproduktiv. Zahalni texnichni umovy: DSTU B V.2.6-183:2011, chynnyi vid 2012-10-01* [Vertical cylindrical steel reservoirs for oil and petroleum products. General specifications: the State Standards B V.2.6-183: 2011, dated on 01.10.2012]. Kyiv, 2012, 77 p.(in Ukrainian).
10. Rudicyn M.N., Artemov P.Ya. and Lyuboshhic M.I. *Spravochnoe posobie po soprotivleniyu materialov* [Reference book on materials resistance]. Minsk: Gosizdat BSSR, 1961, 516 p.(in Russian).
11. Shapiro G.A. *Dejstvitel'naya rabota ploskix dnishh stal'nyx tonkostennyx cilindricheskix rezervuarov* [Real work of flat bottoms of steel thin-walled cylindrical tanks]. *Materialy po stal'nyx konstrukciyam* [Materials on steel structures]. Moskva, 1958, pp. 185–215. (in Russian).
12. Shimanovskij A.V., Kirillov V.V., Belogurov V.D., Umanskij R.Z., Zayarnyj L.V., Razumov A.Yu., Kurochkin D.A. and Svyatun R.YJa. *Nauchno-texnicheskoe soprovozhdzenie i osobennosti proektirovaniya vertikal'nyx tal'nyx rezervuarov emkost'yu 6,5 tys. t* [Scientific and technical support and design features of vertical tall tanks with a capacity of 6,5 thousand ton]. *Promyslove budivnitstvo ta inzhenerni sporudy* [Industrial construction and engineering facilities.]. 2016, no. 4, pp. 28–35. (in Russian).

Рецензент: Слободенюк С. А. д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 10.04.2017 р. Прийнята до друку: 21.04.2017 р.